

Czigány Tibor

KOMPOZIT SZERKEZETI ANYAGOK
TÖNKREMENTELE,
AVAGY AZ ANYAG HAL(L)HATATLAN HANGJA

SZÉKFOGLALÓK
A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIAÁN

A 2013. május 6-án megválasztott
akadémikusok székfoglalói

Czigány Tibor

KOMPOZIT SZERKEZETI
ANYAGOK
TÖNKREMENTELE, AVAGY
AZ ANYAG HAL(L)HATATLAN
HANGJA



Magyar Tudományos Akadémia • 2013

Az előadás elhangzott 2013. október 3-án

Sorozatszerkesztő: Bertók Krisztina

Olvasószerkesztő: Laczkó Krisztina

Borító és tipográfia: Auri Grafika

ISSN 1419-8959

ISBN 978-963-508-688-7

© Czigány Tibor

Kiadja a Magyar Tudományos Akadémia
Kiadásért felel: Pálinkás József, az MTA elnöke
Felelős szerkesztő: Kindert Judit
Nyomdai munkálatok: Kódex Könyvgyártó Kft.

1. Bevezetés

A szerkezeti anyagok három nagy csoportba sorolhatók, ezek a fémek, a polimerek és a kerámiák. Ezek kombinált rendszerei a kompozitok, amelyek olyan összetett szerkezeti anyagok, ahol a szívós mátrix és a nagy szilárdságú erősítőanyag között kiváló adhéziós kapcsolat van. Fémmátrixú kompozit például a vídia fúróhegy, polimermátrixú kompozit a gumiabroncs, míg kerámiamátrixú kompozit a vasbeton. A szerkezeti anyagok hierarchiájának csúcsát a hibrid kompozitok jelentik, amelyek olyan speciális szerkezeti anyagok, ahol az összetevők előnyös tulajdonságait egyesítik, és olyan különleges tulajdonságokkal is rendelkezhetnek, amellyel az egyes alkotók nem. Hibrid kompozitra példának a szélerőművek lapátkerekei hozhatók. A polimerek és kompozitjaik napjaink meghatározó szerkezeti anyagai, közel 50%-a a felhasznált anyagoknak ebből az anyagcsaládból kerül ki. Ezek olyan speciális anyagok, amelyek kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, korrózió- és vegyszerállóak, jól szigetelnek és csillapítanak, továbbá hallatlan előnyük az a mérnöki szabadság, amelynek köszönhetően szélsőséges méretű termékek készíthetők belőlük, akár egy gombostűhegynyi fröccsöntött poliamid fogaskerék vagy a szélkerekek 80 méteres lapátkerekei, amelyet laminálással gyártanak epoxigyantából üveg/szénszál hibriderősítéssel.

Napjainkban számos termék készül polimer kompozitból. Ezt a kiváló szerkezeti anyagot nemcsak sporteszközöknél alkalmazzák (pl. Forma-1-es versenyautók karosszériája vagy teniszütő), és nemcsak a járműipar használja előszeretettel (pl. lökhárítók, motortéri elemek), hanem az építőipar (pl. hidak, tetőszerkezetek), az elektrotechnika (pl. nyomtatott áramköri lemezek, szige-

telők), az orvostechnika (pl. implantátumok) is egyre gyakrabban alkalmazza, vagyis szinte az élet valamennyi területén megtalálhatók. Hallatlan előnye ennek a szerkezeti anyagnak, hogy a szálak megfelelő irányításával és strukturálásával szinte tetszőleges tulajdonságú anyag készíthető, akár unidirekcionális (egyirányú erősítésű) vagy kváziizotrop (a sík minden irányában azonos tulajdonságú). Ugyanakkor mind a mátrixnak, mind az erősítőanyagnak meghatározott funkciója van, a mátrix védi és összetartja a szálakat, valamint közvetíti a terhelést, míg a szálak felveszik a terhelést. Ez a hatékony funkciómegosztás akadályozza meg a kompozit szerkezeti anyagok hirtelen tönkremenetelét.

Az előadás célja valós példákon keresztül bemutatni a polimerek és kompozitjaik tönkremenetelével kapcsolatos kutatási eredményeinket, kiemelve az akusztikus emisszióknak mint roncsolásmentes anyagvizsgálati módszernek a jelentőségét és szerepét.

2. Polimerek és kompozitjaik tönkremenetele

A polimer kompozit szerkezeti anyagok elterjedése megköveteli, hogy azok alkalmazás közbeni lehetséges tönkremeneteli módjait, okait elemezzük, hiszen ma már olyan extrém igénybevételnek kitett speciális helyeken is alkalmazzák őket, mint a sós tengervíz vagy a repüléstechnika, ahol akár néhány perc alatt 100 °C-os hőmérsékletsokk is érheti. A polimer kompozitok tönkremenetele hatalmas károkat okozhat nemcsak anyagi értelemben, hanem az emberélet is kockán foroghat, erre példa a tengeri olajfúró torony és a repülőgép.

Napjainkban egyre inkább kezd elterjedni, hogy a tengeri olajfúró tornyokat polimer kompozit pultrudált kötélkábellel rögzítik a tengerfenékhez. Ezekben a több kilométer hosszú kábeleknél egyirányú szénszálerősítést alkalmaznak, hiszen a jellemző igénybevételi forma a húzás. Hatalmas jelentősége van ezeknek a kábeleknél, nemcsak a fúrótorony egy helyben tartásában, hanem a viharos körülmények közötti biztosításban is. Ezeknek a kábeleknél az anyaga teljes mér-

tékben polimer és polimer kompozit. Kívül egy polietilén (PE) köpeny van, amely egyrészt összetartja a pászmát, de ami a legfontosabb: ellenáll a sós víznek, belül pedig polivinil-klorid (PVC) profilok vezeték a pultrudált szénszál-erősítésű epoxigyanta-mátrixú teherbíró kábeleket. Ezeknek a kábeleknél az elterjedéséhez hozzájárult a 2010 áprilisában a Mexikói-öbölben történt olajfúró torony katasztrófája is. A baleset után sokáig megállíthatatlanul ömlött a nyersolaj a tengerbe, amely végül is 85 napig tartott, ezzel Csernobil után a világ második legnagyobb ökológiai katasztrófáját okozva, amelynek hatása több évtizedig is eltarthat. Látható, hogy mennyire fontos az, hogy ez a rögzítőkábel, amely elsősorban húzásra van igénybe véve, rugalmasan is viselkedjen, például csillapítsa a robbanás okozta hirtelen lökéshullámokat. Ennek ma a polimer kompozit szerkezeti anyagok felelnek meg a leginkább.

A másik példa a repülőgépipar, ahol a polimer kompozitok tönkremenetele súlyos üzemzavart, illetve katasztrófát okozhat. Régebben jellemzően csak az 1–2 személyes kisebb sportrepülőgépek anyaga volt polimer kompozit, ma viszont már a modern utasszállító repülőgépeknél is jelentős százalékban megtalálhatók a polimer kompozitok nemcsak utastéri elemeknél, hanem teherviselő külső alkatrészeknél is, hogy könnyebbek, kisebb fogyasztásúak és nagyobb befogadóképességűek legyenek. Ezeknek a tönkremenetele már több száz emberéletet is veszélyeztethet.

A fenti kiragadott példák alapján fontos területe az anyagtudománynak a polimerek és kompozitjaik, valamint ezek tönkremenetele. Ahhoz, hogy a kompozit anyag viselkedését megismerjük, tudnunk kell az egyes alkotók (mátrix és erősítőanyag) tulajdonságait.

Nagyon fontos, hogy a polimer kompozitban a mátrix szívós legyen. Ezzel sokat foglalkoztunk a törésmechanikai kutatásaink során. A törésmechanika alapfeltevése, hogy a repedés az anyagban jelen lévő hibahelyről indul az igénybevétel hatására. A kérdés az, hogy a repedés megindul-e, vagy sem, vagyis az anyag meny-

nyire képes ellenállni a repedésterjedésnek. A lineárisan rugalmas törésmechanika használhatóságának az a feltétele, hogy az anyag viselkedése a törésig lineárisan rugalmas, polimerek esetében azonban ez a feltétel korlátozottan alkalmazható a polimerek nagy plasztikus deformációja miatt. Ezért igen fontos a polimer szerkezeti elemek méretezésénél a képlékeny törésmechanikai módszerek alkalmazása, hiszen a polimerek szerkezeti anyagként való használatának egyik fő előnye ezek szívóssága, ütésállósága (pl. az autóiiparban a lökhárítók). Polimerek esetében a lényegi törésmunka-elmélet kiterjesztésével elsőként kimutattuk, hogy a teljes törési munka két részre osztható fel, a törés lényegi és képlékeny munkájára. A törés effektív (lényegi) munkája a törési folyamatról, vagyis a repedés instabilitásától függ, és arányos a próbatest maradó szélességével (ligament), a maradék keresztmetszettel, míg a képlékeny rész arányos a képlékeny zóna méretével. Kutatásaink során megállapítottuk, hogy a lényegi törésmunka értéke független a próbatest geometriájától, de függ az anyag molekulaszervezetétől. Bebizonyítottuk, hogy a módszer csak akkor alkalmazható, ha biztosított a síkfeszültségi állapot.¹

A mátrix mellett a polimer kompozitot felépítő másik összetevő a nagy szilárdságú erősítőanyag. Az elmúlt 25 évben szinte minden tipikus erősítőszállal foglalkoztunk (üveg-, szén-, aramid-, természetes szálak), de kutatásaink közül a bazaltszálat és a velük erősített kompozitok előállítását emelném ki. A világon az elsők között készítettünk hőre lágyuló mátrixú bazaltszálak kompozitokat,² és jósoltuk meg, hogy a bazaltszál lehetséges alternatívája az üvegszálnak.³ Ez a jóslatunk beigazolódott, és ma már a világon egyre több bazaltszálat előállító üzem létesül. Rámutattunk, hogy a bazaltkő megolvasztásával készült bazaltszálak

¹ Bárány T., Czigány T., Karger-Kocsis J.: Application of the essential work of fracture (EWF) concept for polymers, related blends and composites: A review. *Progress in Polymer Science* 35(19), 1257–1287, 2010.

² Czigány T.: Special manufacturing and characteristics of basalt fiber reinforced polypropylene composites: Mechanical properties and acoustic emission study. *Composites Science and Technology* 66(16), 3210–3220, 2006.

³ Czigány T.: Trends in fiber reinforcements - the future belongs to basalt fiber. *Express Polymer Letters* 1(2), 59, 2007.

jó alternatívái a ma leggyakrabban alkalmazott üvegszálaknak, köszönhetően jó mechanikai tulajdonságainak, kiváló hang- és hőszigetelő képességének, valamint annak, hogy éghetetlen, biológiailag stabil, nem okoz bőrirritációt, nem toxikus stb. A polimer mátrixszal való kombinációja pedig kiváló szerkezeti anyagot eredményez. Amikor elkezdtünk a bazaltszálakkal és a velük erősített kompozitokkal foglalkozni, még nem voltak ezekből termékek, ma pedig már számos bazaltszálás kompozitgyártmány létezik, a fotóállványtól egészen a szélkerekekig, de több autógyár az új koncepcióautóinak a karosszériáját is bazaltszálás kompozitból tervezi.

A kompozitok egyik kritikus pontja a szál-mátrix határfelület, ha nincs kellő kapcsolat közöttük, akkor nem tudjuk kihasználni a kompozitok előnyös tulajdonságait. A probléma az, hogy sokszor csak a kompozittermék elkészítése után, a terheléspróbánál derül ki, hogy gyenge a szerkezet, amely a rossz határfelületre vezethető vissza. A világon sokan foglalkoznak a határfelület erősségének a javításával, de a probléma az, hogy ez hogyan minősíthető anélkül, hogy a teljes gyártási folyamatot meg kelljen valósítani. Az egyik ismert közvetlen mérési módszer a csepplehúzás, amelynek során egy elemi erősítőszálra mátrixcseppet viszünk fel, és azt lehúzva, az ismert geometriai méretek alapján számítható a határfelületi nyírószilárdság.⁴ Ehhez az eljáráshoz fejlesztettünk ki és gyártottunk le egy egyedi mérőkészüléket. A mérések azonban bebizonyították, hogy a mérési módszer igen bizonytalan, az eredmények szórása nagy, és ez adódik abból, hogy nehéz biztosítani a szabályos csepp alakot, a lehúzópenge sokszor elvágja a cseppet, és a környezetében a feszültségeloszlás igen összetett. Ezért a módszert továbbfejlesztettük, és egy speciális lemezben elhelyezve a mátrixanyagot elértük, hogy a szál mindig ugyanolyan hosszon legyen befogva a mátrixba, valamint az erőbevezetés a fémlemezen történjen, és nem a képlékeny mátrixon. Ez az eljárás a csepplehúzásnál tapasztalt nagy szórás és a valóságnál kisebb értékek helyett,

⁴ Czigány T., Morlin B., Mezey Z.: Interfacial adhesion in fully and partially biodegradable polymer composites examined with microdroplet test and acoustic emission. *Composite Interfaces* 14(7–9), 869–878, 2007.

megbízhatóbb és pontosabb eredményt biztosít,⁵ valamint kevésbé érzékeny a mérést végző személyre és a mérési körülményekre.⁶

A polimer és polimer kompozit szerkezeti anyagok különböző iparágakban való elterjedésével párhuzamosan nő az igény a kötési technológiák, elsősorban a hegesztési módszerek fejlesztésére. Ugyanakkor kevés tapasztalattal rendelkezik a világ a polimerek hegesztésével és hegeszthetőségével kapcsolatban, így a kialakult varrat tudományos szintű elemzése napjaink feladata. Ehhez kifejlesztettünk és megépítettünk egy számítógép-vezérlésű automatizált hegesztőpadot, amellyel elértük, hogy a hegesztési paramétereket széles tartományban változtatva tudtuk a varrat tulajdonságait, geometriáját változtatni. A roncsolásos vizsgálatok, a mikroszkópi felvételek, valamint a varrat és a hőhatásövezet morfológiai elemzése alapján optimalni tudtuk a varrat jósági fokát különböző anyagok esetében. Ugyanakkor a valóságban, ipari körülmények között erre nincs lehetőség, ezért a tudományos eredményeket átültettük a gyakorlatba, és egy hegesztő szakmunkás által is egyszerűen használható, csak a varratgeometriára épülő (hozaganyag lemez síkjából kiemelkedő magassága, lemezvastagság, varratszélesség) úgynevezett dimenzió nélküli számot vezettünk be, amely 95%-os valószínűséggel minősíti a varratot.⁷ Továbbra is probléma azonban a polimer kompozit anyagok hegesztése, hogy a hegesztett kompozitszerkezet varratszilárdsága ne csak a mátrix szilárdságát érje el, hanem annál jóval nagyobb teherbírással rendelkezzen. A mai hegesztési technikákkal nem lehet megvalósítani, hogy az erősítoszál átlógjon a kötésen, így annak szilárdsága elmarad a kompozit alapanyagétól. Ennek érdekében egy új, a könnyűfémeknél alkalmazott hegesztési eljárást, a kavarási dörzshegesztést adaptáltuk polimerekre és kompozitokra, így lehetőség van a varratban erősítoszálak

⁵ Morlin B., Czigány T.: Cylinder test: Development of a new microbond method. *Polymer Testing* 31(1), 164–170, 2012.

⁶ Morlin B., Vas L. M., Czigány T.: Investigation of fiber/matrix adhesion: Test speed and specimen shape effects in cylinder test. *Journal of Materials Science* 48(8), 3185–3191, 2013.

⁷ Marczis B., Czigány T.: Interrelationships between welding parameters of hot-gas welded polypropylene. *Polymer Engineering and Science* 46(9), 1173–1181, 2006.

jelenlétére, megfelelő technológiai fejlesztéssel.⁸ A kavaró dörzshegesztés lényege az, hogy egy gyorsan forgó szerszám végighalad az összehegesztendő alkatrészek között, majd megömlesztve és összekavarva ezeket a szerszám mögött kialakul a varrat. A hegesztésre alkalmas szerszámok jellemzője a váll és az orsó kialakítása. A váll a munkadarab felületét nyomja, és szabályozza a képlékeny hegesztési övezetet. Az orsó fő feladata a súrlódásból származó hő generálása, valamint az anyagáramlás megfelelő alakítása. Színes lemezek hegesztésekor vettük észre, hogy az egyes anyagok összefésülődnek, vagyis alkalmas lehet a módszer kompozitok hegesztésére. A speciálisan kialakított szerszámnak és a gondosan megválasztott technológiai paramétereknek köszönhetően sikerült elérnünk az erősítőszálak átlapolódását, így a kompozitok hegeszthetőségét, amelyet különböző mechanikai vizsgálatokkal igazoltunk, valamint pásztázó elektronmikroszkópos és komputer-tomográfós felvételekkel is alátámasztottunk.⁹

Fontos alkalmazási területe a polimer kompozit szerkezeti anyagoknak az energetika, hiszen a termelés és a tárolás mellett (pl. csövek, tartályok, szélkerekek) az energiaszállításban is a jövő szerkezeti anyagának tekintik. Ennek oka, hogy a távvezetéseken keresztül a villamosenergia-szállítás a figyelem középpontjába került, köszönhetően az egyre gyakoribb szélsőséges időjárási körülményeknek. A nagy szél, a hó- és jégteher a távvezetékek leszakadásához, oszlopok kidőléséhez vezetnek. Napjainkban az elektromos energia felhasználása rendkívüli mértékben növekszik a globalizációnak és a különböző nagy fogyasztású háztartási eszközöknek köszönhetően (pl. csak az elmúlt tíz évben Magyarországon 30%-kal, Kínában pedig 300%-kal növekedett). Az energia megtermelésének lehetőségei adottak (pl. víz-, gáz- vagy akár atomerőművekkel), de szállítása problémákba ütközik, ugyanis a napjainkban alkalmazott fémházú távvezeték-technológia

⁸ Kiss Z., Czigány T.: Effect of welding parameters on the heat affected zone and the mechanical properties of friction stir welded poly(ethylene-terephthalate-glycol). *Journal of Applied Polymer Science* 125(3), 2231–2238, 2012.

⁹ Kiss Z., Czigány T.: Microscopic analysis of the morphology of seams in friction stir welded polypropylene. *Express Polymer Letters* 6(1), 54–62, 2012.

elérte kapacitásának és alkalmazhatóságának a határait, ugyanis ha több energiát vinnénk át a vezetékeken, azok hőmérséklete meghaladná a maximális üzemi hőmérsékletet. Ugyanakkor nem tudunk vastagabb kábeleket alkalmazni, mert akkor még nehezebbek lennének, és az önsúlyuk miatt is már leszakadnának, továbbá nem tudunk új oszlopokat sem beiktatni vagy a régieket sűríteni, hiszen sokszor ezek környezete már teljesen beépült. Így csak egy megoldás maradt, az anyagfejlesztés. További probléma a vezetékek belógása az oszlopok között, amelyet a hőtágulás és a sodronyszerkezet sajátosságai együttesen okoznak. A sodrony felmelegszik, hossza megnő, és szerkezetéből adódóan képes elasztikusan deformálódni. Ennek következtében az önsúly meghajlítja a sodronyt, amely így közelebb kerül a talajhoz. A belógást azért is célszerű elkerülni, mert a távvezeték körül kialakul egy erős elektromágneses mező. Ez, ha túl közel kerül a talajhoz, egészségügyi és egyéb más problémákat is okozhat, például a távvezetékek közelében élők körében gyakoribbak a fehérvérűség és a különböző alvási problémák. További gond még a korrózió, mivel a sodronyszerkezet engedi befolyjni az esővizet egészen az acélmagig.

A fenti problémákra megoldást jelenthet a sodrony fémmagjának helyettesítése polimer kompozittal. A megfelelő kompozit anyagok jobb szilárdság-sűrűség aránnyal rendelkeznek, mint az acél, így kisebb belógást eredményeznek. A high-tech kompozitokhoz napjainkban általában hőre keményedő mátrixokat (elsősorban epoxigyantákat) alkalmaznak. Ezek az anyagok kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, amelyek alkalmassá teszik őket arra, hogy távvezetési sodronyok teherviselő magjai legyenek. Újrahasznosításuk azonban problémás, ezen kívül mikrorepedésekre hajlamosak. Ezen túlmenően az epoxigyantákat térhálósítani kell, ez időigényes folyamat, és lassítja a gyártást. Az előbbi problémák megoldására a hőre lágyuló mátrixanyagok új generációja, a ciklikus butilén-tereftalát (CBT) polimer jelenthet megoldást. Halmazállapota szobahőmérsékleten szilárd, olvadása után pedig vízszerűen kicsi viszkozitással (0,1 Pas

alatti) rendelkezik, és ez megkönnyíti az impregnálást, majd ezután az erősítőszálak között katalizátor jelenlétében polimerizálódik.¹⁰

A fentiek alapján munkatársaimmal szabadalmaztattuk ötletünket,¹¹ amelynek az a lényege, hogy egy olyan speciális pultrúziós folyamatos gyártási technológiát fejlesztettünk ki, amely lehetővé teszi a szénszállal és a nanorészecskékkel erősített, hőre lágyuló mátrixú mag kifejlesztését, amely minden tekintetben megfelel a követelményeknek.¹² Ehhez az anyag receptúrájának kidolgozása mellett megterveztük a szükséges eszközöket és szerszámokat, amelyekkel próbagyártást végeztünk. A kísérletek és az anyagvizsgálati eredmények olyannyira biztatóak, hogy jelenleg folyik a kísérleti gyártása néhány kilométer polimer kompozit magú távvezetéknek, hogy valós körülmények között is tesztelni lehessen ezt az új kompozitkábelt.

A jövőben kiemelten szeretnénk foglalkozni új, modern szerkezeti anyagok fejlesztésével. Egyrészt a részben, illetve teljesen lebomló polimerek és kompozitjaik előállításával,¹³ a biokompozitok nagy teherbírású alkatrészeknél való alkalmazhatóságával,¹⁴ másrészt az intelligens kompozitokkal. Ez utóbbiak az úgynevezett bioinspirált szerkezeti anyagok, például az élő szervezeten keletkezett

¹⁰ Balogh G., Czigány T.: Effect of low fibre volume fractions of UD carbon on the mechanical properties of in-situ polymerized cyclic butylene terephthalate. *Plastics, Rubber and Composites: Macromolecular Engineering* 40(3), 121–124, 2011.

¹¹ Szaplanczay P., Karger-Kocsis J., Czigány T., Zsigmond B.: Eljárás nagy teherbírású és hőálló távvezetési kábel hőre lágyuló mátrixú kompozit magjának előállítására. Magyar és nemzetközi szabadalom. Lajstromszám: 228 364, Ügyiratszám: P0800256. Nemzetközi szabadalmi szám: WO 2009130525 A1.

¹² Balogh G., Hajba S., Karger-Kocsis J., Czigány T.: Preparation and characterization of in situ polymerized cyclic butylene terephthalate/graphene nanocomposites. *Journal of Materials Science* 48(6), 2530–2535, 2013.

¹³ Dogossy G., Czigány T.: Thermoplastic starch composites reinforced by agricultural byproducts: properties, biodegradability and application. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 30(21), 1819–1825, 2011.

¹⁴ Romhány G., Czigány T., Karger-Kocsis J.: Determination of J-R curves of thermoplastic starch composites containing crossed quasi-unidirectional flax fiber reinforcement. *Composites Science and Technology* 66(16), 3179–3187, 2006.

sebesülés (pl. bőrsérülés) analógiájára regenerálják, önjavítják magukat. Hiszen ha megsebesül a bőrünk, az néhány napon belül meggyógyul, mert az immunrendszer érzékeli a problémát, és a védekezőmechanizmus beindul, hogy regenerálja a bőrt. Hasonlóan a fák, ha sebesülés éri őket, gyantát juttatnak a sérült részhez, hogy védjék azt, és minél hamarabb megtörténjen a gyógyulás. Ezt meg lehet valósítani a polimereknél például olyan mikrokapszulákkal, ahol a kapszulába töltött folyékony javítóanyag a kapszula feltörésekor a kapilláris hatásnak köszönhetően befolyik a repedésekbe, majd ott kitérhálósodva szünteti meg az anyagfolytonossági hiányt. Ez különösen fontos lehet fárasztó igénybevételnek kitett járműalkatrészeknél. Másik lehetőség, hogy üreges erősítőszálakat alkalmazunk, és ezekbe töltjük a javítófolyadékot, vagy olyan „jelző”-anyagot használunk, amely belefolyva a repedésekbe kimutatja ezeket például UV-fénnyel történő megvilágítás esetén.¹⁵

3. Akusztikus emissziós anyag- és szerkezetvizsgálat

A hangoknak jelentős szerepe van a kutatói pályámon. A címben a hal(l)hatatlanság kettőse arra utal, hogy a hang hullámként, megállíthatatlanul terjed, vagyis nem hal el, másrészt utal arra, hogy nem minden hangot vagyunk képesek emberi füllel meghallani.

Az embernek öt alapvető érzékszerve van: tapintás, hallás, szaglás, ízlelés, látás. Az érzékszerveink azok, amelyek a külvilággal kötnek össze bennünket. Gondoljunk bele, mi történne velünk az érzékszerveink nélkül. Hogyha sorrendet szeretnénk állítani, hogy ezek közül mi a legfontosabb és kevésbé fontos, vagyis mi az, ami nélkül nem vagy kevésbé tudnánk élni, akkor valószínűleg a legtöbben a látás, hallás, tapintás, szaglás, ízlelés fontossági sorrendet jelölnék meg. Az ember majdnem minden érzékszervének korlátait kiszélesítette: tapin-

¹⁵ Kling S., Czigány T.: A comparative analysis of hollow and solid glass fibers. *Textile Research Journal* 83(16), 1764–1772, 2013.

tását szuperérzékeny detektorokkal finomította, szaglását és ízlelését a legkisebb koncentrációváltozást kimutató érzékelők teszik ingerlékenyebbé (elektronikus orr és nyelv, például PET palackok újratöltése előtt egy detektor belógatása a palackba vagy élelmiszer ízellenőrzésénél detektor benyomása az ételbe). Hallókészülékkel felerősíthetjük a hangokat, szemüveggel javíthatjuk a látásunkat, sőt mikroszkóppal szabad szemmel nem látható objektumokat vizsgálhatunk, akár atomi méretű felületekről szerezhetünk információt. Ám az emberi hallás határain túl lévő hangokat nem tettük érzékelhetővé fülünk számára, nem halljuk, hogyan nő a fű, nem halljuk hogyan hull a hó, nem halljuk milyen hangokat bocsátanak ki egyes állatok, nem halljuk a kompozit szerkezeti anyag által kibocsátott hangokat, és nem halljuk a csend hangját sem. Mi kell ahhoz, hogy halljuk a csend hangját? Érdekes, hogy Ludwig van Beethoven teljesen süketen is komponált, azt mondta, hogy belülről hallja a zenét, nagyon erős belső hallása volt. Persze, ehhez kellett a technika is, köztudott volt, hogy fogai közé dobverőt szorított, amelynek a másik végét a zongora fedőlapijára illesztette. A zongora rezgése a dobverőn keresztül, a fogak közvetítésével a koponyacsontot hozta rezgésbe, ennek köszönhetően sikerült érzékelnie a zenét. Vagyis megfelelő technika kell ahhoz, hogy halljuk azt is, amire nem vagyunk képesek.

Az emberi hallás tartománya nagyjából 16–20 000 Hz között van. Az ennél alacsonyabb hangokat infrahangnak, a magasabbakat ultrahangnak, a 10^{10} Hz felettieket pedig hiperhangnak nevezzük. Ezeket az emberi fül nem érzékeli. A korrall együtt csökken a hallási érzékenység a nagy rezgésszámú, igen magas hangok területén. Csecsemőként 20 000 Hz, tizennyolc éves korban kb. 18 000 Hz, 35 éves korban kb. 15 000 Hz, 50 éves korban kb. 13 000 Hz a hallás felsőhatára, egy nyugdíjas korú embernek pedig akár 10 000 Hz alá is csökkenhet a hallása. Mindezek ellenére a csökkent érzékenységű fül a szimfonikus zenét teljes terjedelmében élvezheti, mert a zenekarban alkalmazott legmagasabb hang a pikolófuvalé, amely csak 4608 Hz-es.

Az állatok 20 000 Hz-nél magasabb hangokat is keltenek, ennek megfelelően fülük ilyen hangokat is észlel. A kutya, a macska akár 30 000–40 000 másodpercenkénti rezgést is meghall. A denevérnek az emberi fül által hallható cincogó hangja a hallhatóság felső határán van, de a denevér még ennél nagyobb rezgésszámú hangokat is ad, és füle a 60 000 másodpercenkénti rezgésű hangokat is hallja. Sőt a delfinek akár 200 000 Hz tartományú hangokat is képesek kiadni és érzékelni, ez alapján tudnak nagyon gyorsan és pontosan tájékozódni. A bálnák, az elefántok és a tigrisek képesek 16 Hz-nél kisebb infrahangot kibocsátani. Az elefánt akár 0,1 Hz-es hangokat is hall, amellyel a távoli eső hangját is könnyen meghallhatják, mivel a zivatarok nagyon erős infrahangokat keltenek. Mivel az infrahang messzire terjed, az elefántok infrahanggal kommunikálhatnak a csorda akár több száz kilométerre lévő távoli tagjaival. A tigris „hangtalan” alacsony frekvenciás üvöltése alkalmas arra, hogy megbénítsa és megfélemlítse áldozatait és akár idomárait is, mivel az állatok többsége és az ember sem hallja ezt az infrahangot, de tudat alatt mégis érzékeli ezeket az alacsonyabb rezgéseket.

A hangokat frekvenciájuk alapján négy nagy csoportra oszthatjuk: infrahang, hallható hang, ultrahang, hiperhang. 16 Hz-ig infrahangról, 20 000– 10^{10} Hz-ig ultrahangról, a felett pedig hiperhangról beszélünk. Az előzőekben már említettem az ember és az állat által kibocsátott és hallott hangokat, a következőkben ezek technikai, műszaki jelentőségéről lesz szó.

A két véglet az infrahang és a hiperhang. Az infrahangok 16 Hz alatti frekvenciatartományban találhatók, és az emberi szervezetre károsak lehetnek (pl. a vérkeringés saját rezgésszáma 8 Hz körül van). Az infrahangok kellemetlen élet-tani hatása, hogy fáradtságot, fejfájást, látási zavart, figyelmetlenséget is okozhat. Az infrahangok nagy távolságra jutnak el erősségük észrevehető csökkenése nélkül. Infrahang kibocsátása kíséri többek között a nagy légköri viharokat, a tornádókat, a lavinaomlást, a földrengéseket, a vulkánkitöréseket is. Ma már megkülönböztethető a természeti jelenségek infrahangja, mivel az egyes jelenségekhez más frekvenciaeloszlású, eltérő időtartamú és erősségű hangok tartoznak.

Azok az állatok, amelyek képesek az infrahangot meghallani, például földrengés előtt idegesen, izgatottan viselkednek, e megfigyelés alapján a kutatók napjainkban komoly erőfeszítéseket tesznek annak érdekében, hogy a természeti katasztrófákat előre jelezzék.

A hiperhangokat csak néhány évtizede ismerjük, és ez már átvezet a kvantumfizikába, ahol azt vizsgálják, hogyan lesz a hangból fény, illetve hogyan képződik a fekete lyuk. A technikában azonban ma az ultrahang a legfontosabb.

Az ultrahangok gyakorlati felhasználása napjainkban igen szerteágazó, az egyik leggyakoribb területe az orvosi diagnosztika, ahol kihasználják, hogy az ultrahang a határfelületekről visszaverődik (legjobban a folyadékról), és ez látható képpé alakítható. Ezt a módszert alkalmazzák az ultrahangos terhességvizsgálatnál, mivel a méhen belül fejlődő magzatot a magzatvíz körbeveszi, így a vizsgálat során a magzat kontúrjai láthatóvá válnak. Az orvostechikában további számos helyen alkalmazzák az ultrahangos vizsgálati és gyógyítási módszert, kimutathatók segítségével a különböző káros elváltozások (pl. szívultrahang), lokalizálható a vese- vagy epekő, eltávolítható a fogkő, „feloldható” a vérrög, de akár zsírszívásra is használhatják.

Az iparban is számos helyen alkalmazzák az ultrahangot, amelyet akusztikus emissziós eljárásnak is neveznek. Segítségével meg lehet akadályozni, hogy csövekben és tartályokban (pl. vízvezetékben, gőzkazánokban) lerakódjék a szennyeződés. Ugyanakkor, mint állapotellenőrzési módszer is kiválóan alkalmazható, kimutathatók segítségével a hegesztési varratoknál a varratban lévő folytonossági hiányok, öntvényeknél az öntési hibák és üregek, de alkalmas szívárgások detektálására is.

Az akusztikus emissziós (AE) anyag- és szerkezetvizsgálat nem új keletű dolog, hiszen már évszázadok óta ismeretes a különböző anyagokon belüli meghibásodási folyamatok „hangjainak” a jelentése. A fák és a kőzetek különfé-

le, az ember által is hallható hangokat bocsátanak ki, amikor repedni vagy törni kezdenek. Hasonló hangokat fedeztek fel az ónból készült alkatrészek hajlításakor, amelyet az ón „sírásának” neveztek. Hooke már a 17. század végén leírta, hogy a testek belső mozgásai feltárhatók az általuk keltett hangokból. Sőt már a 19. században használta az orvostudomány a sztetoszkópot az emberi test belső hangjainak a vizsgálatára. Annak ellenére, hogy felismerték az összefüggéseket a hangkibocsátás és az anyagon belüli meghibásodási folyamatok között, a hallhatóság tartományán kívüli hangokat csak alig több mint 60 év óta tudjuk detektálni. 1950-ben a Münchener Műszaki Egyetem tanára, Joseph Kaiser volt az, aki elsőként tudta detektálni az anyag alakváltozásakor keletkező zajokat olyan elektronikus készülékkel, amely a hallható tartományon kívüli jeleket is felfogta. Kaiser egyik legfontosabb megfigyelése az volt, hogy a hangok keletkezése visszafordíthatatlan folyamatokra utal.

Amikor igénybevétel hatására (pl. mechanikai, hő) esemény történik az anyagban, annak hanghulláma kikerül a felületre, és ezt egy arra megfelelő detektorral (mikrofonnal) tudjuk érzékelni és felfogni. A módszer alkalmazásának az az előnye, hogy a vizsgálati módszer roncsolásmentes, és a hibát indikáló jeleket maga a vizsgált anyag állítja elő, valamint az akusztikus jelenséget, mint minőségi és gyártásellenőrzési módszert, egyszerre lehet felhasználni. Az AE-mérések során mért fizikai mennyiségekből (amplitúdó, energia stb.) meglehetősen nagy biztonsággal megállapíthatók, hogy mikor milyen károsodási folyamat játszódik le az anyagban. A görbelefutásokból pedig jól lehet következtetni arra, hogy pontosan mi és mikor játszódik le az anyagban, így jól elkülöníthetők a mátrix és az erősítőanyag tönkremeneteli formái. Például kompozitok esetén e jellemző tönkremeneteli formák a mátrixdeformáció és -tépődés, a delamináció (rétegelválás), a száلكihúzóadás és a szálszakadás, amelyek jól megkülönböztethetők AE-módszerrel. Az AE-jelekből a határfelületi adhézió minőségére is kiválóan lehet következtetni, hiszen a kis amplitúdójú (kisebb energiájú) események gyengébb,

a nagyobb amplitúdójú (nagyobb energiájú) események az erősebb szál/mátrix adhézióra utalnak.¹⁶

Az üzemi igénybevétellel terhelt szerkezeti elemek csak akkor felelnek meg, ha kellő biztonságot nyújtanak a meghibásodások különböző lehetőségeivel szemben. A szerkezetek legveszélyesebb meghibásodási formája a törés, mivel ez legtöbbször megghiúsítja a funkció teljesítését, és a jelentős anyagi káron kívül az emberélet is kockán foroghat. Mivel a törést megelőzi a repedéskeletkezés, ezért a mai törésmechanikai kutatások esősorban arra irányulnak, hogy megismerjük a szerkezetek törés előtti viselkedését, a repedések keletkezésének és terjedésének a körülményeit. Ezért használunk a vizsgálatokhoz úgynevezett törésmechanikai próbatesteket, amelyek közös jellemzője az, hogy mind bemetszettek, így idézzük elő a repedés keletkezését, és egyben ismerjük ennek a pontos helyét is. A feszültség hullámok akkor keletkeznek, amikor szilárd halmazállapotú anyagokban alakváltozási vagy törési folyamatok során energia szabadul fel. Függetlenül a vizsgált anyagtól vagy a vizsgálat körülményeitől, az AE tulajdonképpen a vizsgált anyag lokális instabilitásainak a következménye. A terhelés hatására az anyag egyre kisebb belső energiájú állapotba kerül, egyre szaporodó helyi instabilitások során veszíti el belső energiáját, és kerül a teljes instabilitás állapotába (pl. törés). A törést előidéző feszültségeknél majdnem minden anyagnál hang, illetve akusztikai kisugárzás lép fel. Az akusztikai kisugárzás egy olyan hanghullám vagy pontosabban feszültség hullám, amely végighalad az anyagon. A folyamat maga egy olyan hirtelen energiafelszabadulás, amelyet a feszültség okoz. A feszültség nem hallható, annak következménye azonban igen.

Ha nemcsak egy, hanem több mikrofónt is használunk (2, 3 vagy 4), akkor be tudjuk lokalizálni az események keletkezési helyét is.¹⁷ Ez a szerkezetvizsgálá-

¹⁶ Dogossy G., Czigány T.: Failure mode characterization in maize hull filled polyethylene composites by acoustic emission. *Polymer Testing* 25(3), 353–357, 2006.

¹⁷ Czigány T.: An acoustic emission study of flax fiber reinforced polypropylene composites. *Journal of Composite Materials* (IF=0.604) 38(9), 769–778, 2004.

toknál, például egy tartály minőség-ellenőrzésénél nagyon fontos. Ehhez ismerni kell a szerkezet geometriáját, valamint a hangterjedési sebességet, amely minden anyagban más és más. Minél ridegebb, keményebb az anyag, annál nagyobb sebességgel terjed benne a hanghullám. A lokalizációnak jelentősége a károsodási zónaméret meghatározásában van. Például egy tartály esetén hova lehet csőcsonkot tenni, vagy egy szélkeréklapát esetén hova lehet furatokat tervezni.

Az AE segítségével nemcsak a károsodási formákat és azok helyét tudjuk meghatározni, hanem akár a kompozit anyag összetételére is következtethetünk. Például jól megkülönböztethető a rövid- és a hosszúszál-erősítésű rendszerek tönkremenetele során detektált AE-jelek nagysága és eloszlása. Ugyanakkor a kibocsátott hang az anyag fizikai állapotával is összefüggésbe hozható, segítségével kimutatható a kompozitok nedvességtartalma, amely igen fontos például az egyik leggyakrabban alkalmazott autóiipari műanyagnál, az üvegszál-erősítésű poliamidnál. A nedves anyag akusztikus aktivitása gyengébb, az AE görbelefutása szélesebb (szívósabb viselkedésre utal), mint száraz anyag esetén. Ugyancsak összefüggésbe hozható az egyes anyagok AE-paraméterei azok mechanikai anyagjellemzőivel, mint feszültség, rugalmassági modulus, törési szívósság, energiaelnyelő képesség. Kimutathatók az AE segítségével a korrelációk nemcsak a mechanikai tulajdonságok között, hanem a mechanikai tulajdonságok és az AE jele között. Ennek nagy előnye az, hogy üzem közben a szerkezet által kiadott hangokból következtethetünk a feszültségi állapotra, és szükség esetén be tudunk avatkozni akár egy automatikus vészleállással. Ez üzem közbeni állapotfelügyeletet tesz lehetővé akár tartályoknál, járműveknél vagy épületeknél is.

Felmerül a kérdés, hogy miért lenne fontos olyan dolgokat is hallani, amelyet szabad füllel nem vagyunk képesek, csak megfelelő műszerek, berendezések segítségével. Mert a hang egy olyan hullám, amelynek segítségével sok információhoz juthatunk. Mivel a hang bármelyik irányból hozzánk juthat (szemben a látással, amely hozzátvetőleg 170 fokban érzékel), ezért általában a hangok alkalmasabbak a nem várt veszélyek jelzésére. Ezért vállalkoztunk arra, hogy az ultrahang-

tartományú akusztikus emissziós jeleket hallhatóvá tegyük az ember számára is. A különböző anyagok során mért AE-jelek feldolgozására programot írtunk LabVIEW grafikus fejlesztői környezetben logaritmikus módosítással.¹⁸ A program célja, hogy az akusztikus emissziós mérési adatokból hallható hangot hozzon létre. Cél volt, hogy az eredeti, nem hallható hangok karakterét minél jobban visszaadja, az ember számára jól érzékelhető módon. A anyagok által kibocsátott hangok fizikai paraméterei (amplitúdó, frekvencia stb.) erősen függenek a vizsgált anyag összetételétől. Más tartományban „szólal meg” a fa, az acél, az alumínium, a polimer. Sokkal bonyolultabb és összetettebb a kompozitok által kibocsátott hangok analízise, hiszen itt a homogén anyaghoz képest a keletkezett hangok száma többszöröse, és a károsodási forma is bonyolultabb. Célunk volt az emberi füllel nem hallható, a szerkezeti anyagok által ultrahangtartományban kibocsátott hangok hallhatóvá tétele és a különböző anyagok hangjainak az összehasonlítása. Az eredmények alapján megállapítottuk, hogy minél homogénebb egy anyag, annál kisebb az akusztikus aktivitása. Az alumínium kevés jelet bocsát ki az acélhoz képest, amely pedig kevés jelet bocsát ki a fához vagy a kompozithoz képest. A kompozitoknál megfigyeltük, hogy ahogy a repedésfront terjed, eléri egy szálköteghez, amely megállítja, majd a terhelés növekedésével ismét megindul, és ez periodikusan ismétlődik. A különböző szerkezeti anyagok által kibocsátott hangoknak, az emberi fül számára való hallhatóvá tételével bemutattuk a különbséget az egyes szerkezeti anyagok viselkedése között.

Az érzékszerveink jelentőségéről, azok furcsa párosításairól vall a 100 éve született Weöres Sándor a *Variáció* című versében. Érdekes, hogy ez a mű az írásakor, a költő részéről egyfajta misztikus költői túlzás volt, de ez napjainkra kezd mindinkább a kutatások előterébe kerülni, és előbb-utóbb „hallani” fogjuk a különböző színeket, az ízeket, az illatokat, és ami egy mérnöknek nagyon fontos, hallani fogjuk az anyagok hangját.

¹⁸ Marczis L. P., Herbay M.: *Az anyagok hangja*. TDK-dolgozat, BME, 2001. A 2013-as OTDK I. díjas dolgozata. Témavezetők: Czigány T., Lipovszki Gy.

Weöres Sándor: Variáció

a hangok illata
az illatok íze
az ízek színe

a színek hangja
a hangok íze
az ízek illata

az illatok színe
a színek íze
az ízek hangja

a hangok színe
a színek illata
az illatok hangja

4. Összefoglalás

A polimer és a polimer kompozit szerkezeti anyagok a 20. és a 21. század anyagai, amelyet az ember alkotott meg. Segítségével jutott el a mai kényelmi, biztonsági és technikai szintre az orvostechika, a közlekedés, az elektronika, az infokommunikáció, az energetika stb. Ma már a fenntartható fejlődés egyik zálogának tekintik az anyagtudomány, ezen belül a „polymer engineering” fejlődését. Ennek a szerkezeti anyagnak az alkalmazása és az új technológiák fejlődése együttesen teszik lehetővé többek között az életminőség javulását, a biztonságos közlekedést, a gyors információáramlást, a megújuló energiatermelést stb. Az egyre jobb mechanikai tulajdonságú, könnyű, intelligens, környezetbarát, megújuló polimer és kompozit szerkezeti anyagok alkalmazása hozzájárul az emberiség életkörülményeinek a javításához. A nano-, bio- és hibridkompozitok, az öngyógyuló és alakemlékező polimerek elterjedése lehetővé teszik az emberiség számára az erőforrásokkal való felelősségteljes és biztonságos gazdálkodást, amely alapja a fenntartható fejlődésének.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani ajánlóimnak, Vajna Zoltán, Kollár László, Ginsztler János és Prohászka János akadémikusoknak, akiknek a bizalma és ajánlása lehetővé tette a jelölésemet. Köszönet munkatársaimnak, a BME Polimertechnika Tanszék dolgozóinak, akikre mindig számíthattam és számíthatok, hihetetlen munkabírással rendelkeznek. Kiemelten köszönöm a segítségét Karger-Kocsis József, Marosfalvi János, Czvikovszky Tibor és Váradí Károly professzor uraknak, akik diákkoromtól kezdve voltak szakmai támogatóim. Külön kiemelném Marosfalvi János professzor urat, akinek a tanácsára kezdtem el foglalkozni a polimer gépszerkezeti elemekkel, és az ő vezetésével készítettem el egyetemi doktori értekezésem, ő tanított meg a tudományos alaposságra és érdeklődésre. Ő volt az, akinek segítségével először tölthettem hosszabb időt egy németországi kutatóintézetben, ahol megismerkedtem későbbi szakmai mesteremmel Karger-Kocsis József professzorral, aki a polimerek és kompozitjaik szakterület legnagyobb nemzetközi szaktekintélye. A vele való találkozás a legmeghatározóbb mozzanat a tudományos pályámon, ez a kapcsolat a mai napig nagyon szoros. Karger-Kocsis professzortól tanultam meg a szakmát, ő volt, aki az alapoktól kezdve bevezetett a polimerek és kompozitjaik világába, tanított meg a szakmai alázatra, az ő szerénysége mintául szolgált és szolgál ma is. Köszönet továbbá diákjaimnak a folyamatos inspirálásért, valamint családomnak a támogatásért és a kitartásért.

